

张 霞, 潘孝青, 李 健, 等. 兔粪与中药渣低碳氮比堆肥理化性质变化特征[J]. 江苏农业学报, 2020, 36( 6 ): 1459-1467.  
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2020.06.015

## 兔粪与中药渣低碳氮比堆肥理化性质变化特征

张 霞, 潘孝青, 李 健, 邵 乐, 秦 枫, 顾洪如, 翟 频, 杨 杰  
(江苏省农业科学院畜牧研究所/农业农村部种养殖结合重点实验室, 江苏 南京 210014)

**摘要:** 为了提高兔粪有机肥生产和资源化利用效率, 针对兔粪与中药渣高温发酵过程, 研究兔粪堆肥过程中理化性质等的变化特征。结果表明, 在低 C/N 条件下, 堆制期间的堆肥温度在堆制 2~34 d 持续保持在 60~70 ℃, 堆制 34 d, 堆肥含水量降至 44%, 氮、磷、钾总养分含量上升至 85.26 g/kg, 有机质含量下降至 42.00%, 均达到 NY/T 3442-2019《畜禽粪便堆肥技术规范》的要求; 堆肥总腐殖酸含量、富里酸含量及胡敏酸含量总体均表现为降低的趋势; 堆肥 pH 值整体呈现先升高后降低的趋势, 堆制 34 d, pH 值为 9.28, 呈碱性, 高于 NY/T 3442-2019《畜禽粪便堆肥技术规范》的要求。本研究采用萝卜种子发芽指数来确定堆肥的腐熟情况, 结果显示, 在本试验条件下, 兔粪堆制 24 d 已经达到堆肥腐熟的要求。此外, 研究结果显示, 堆制 34 d, 堆肥的 Cr、Cu、Zn、As、Cd、Pb、Hg 含量均低于 NY/T 3442-2019《畜禽粪便堆肥技术规范》与 NY 525-2012《有机肥料》规定的限量标准。从重金属含量角度分析可知, 兔粪有机肥是较为安全的有机肥。

**关键词:** 兔粪; 中药渣; 好氧堆肥; C/N; 理化性质

**中图分类号:** X713 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2020)06-1459-09

## Variation characteristics of physical and chemical properties of compost during composting process of rabbit manure and traditional Chinese medicine residue at low carbon/nitrogen ratios

ZHANG Xia, PAN Xiao-qing, LI Jian, SHAO Le, QIN Feng, GU Hong-ru, ZHAI Pin, YANG Jie  
(Institute of Animal Science, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Crop and Livestock Integrated Farming, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** In order to improve the production and utilization efficiency of rabbit manure, rabbit manure and traditional Chinese medical residue were used as materials during hightemperature composting. The variation characteristics of physical and chemical properties of rabbit manure were studied. At low carbon/nitrogen ratios, during the composting period, the water content of compost decreased to 44%, the total nutrient contents of nitrogen, phosphorus and potassium increased to 85.26 g/kg, and the organic matter content decreased to 42.00%, all these properties met the requirements of the <Technical specification for animal manure composting> (NY/T 3442-2019). The total humic acids content, fulvic acid content and humic acid content showed a decreasing trend. The pH value of the compost increased first and then decreased. After 34 days of composting, the pH value was 9.28, which was alkaline and higher than that required by the technical specification for animal manure composting (NY/T 3442-2019). The germination index of radish seed was used to

收稿日期: 2020-05-22

基金项目: 江苏省农业科技自主创新基金项目[ CX(18)2001 ]; 国家兔产业技术体系——南京综合试验站项目( CARS-43-G-2 )

作者简介: 张 霞( 1976- ), 河南新乡人, 博士, 副研究员, 主要从事畜禽粪便综合利用研究。( E-mail ) 583765990@qq.com

通讯作者: 杨 杰, ( E-mail ) 598320394@qq.com

determine the maturity of compost, and it was considered that the rabbit manure composting for 24 days had reached the requirements of compost maturity. Contents of Cr, Cu, Zn, As, Cd, Pb and Hg were all lower than the limit standards specified in <Technical specifications for animal manure composting> (NY/T 3442-2019) and <Organic

fertilizer> (NY 525-2012). Rabbit manure fertilizer is a safe organic fertilizer.

**Key words:** rabbit manure; Chinese medicine residue; aerobic composting; carbon/nitrogen ratio; physical and chemical properties

近年来,中国兔养殖业的规模化、集约化程度越来越高,已经成为许多地区的支柱型产业,但随之产生的大量粪便造成了严重的环境问题。目前,国内兔粪的主要处理模式通常是经过简单的收集贮存后直接销售给种植户或经中间商收购后再销售给种植户<sup>[1-2]</sup>。在江苏省,兔粪的处理方式还有通过兔粪中间商收购后外销给水果种植户,但是在运输过程中容易污染沿途的环境。兔粪是兔养殖业的主要副产物,含有丰富的氮、磷、钾和有机质等养分<sup>[1]</sup>。相对于猪粪、牛粪、鸡粪等其他畜禽粪便,兔粪内的重金属含量较低<sup>[1,3]</sup>,并且作为有机肥,兔粪具有较高的利用价值和经济效益。目前,中国对猪场、鸡场以及奶牛场等养殖场废弃物的利用和研究比较多,但是对兔场废弃物的研究还很少,随着兔规模化养殖范围的扩大,兔场粪污处理成为兔养殖企业的一个重

要问题。本研究基于有机肥厂兔粪高温发酵生产堆肥的过程,研究兔粪堆肥过程中理化性质的变化特征,以期兔粪的资源化利用提供技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料与堆制方法

本试验在江苏省农业科学院六合动物科学基地有机肥厂进行。新鲜兔粪采自江苏省农业科学院六合动物科学基地实验兔场,有机辅料为发酵过的混合中药渣(由江苏康缘药业股份有限公司提供),堆肥原材料的基本性状见表 1,磷、钾含量与常见重金属元素含量见表 2。兔粪与中药渣按质量比约 10:1 混合,水分含量约为 69%,建成长×宽×高为 15.0 m×2.0 m×1.5 m 的堆体后,每 3 d 机械翻堆 1 次,试验期为 35 d,具体为 2019 年 8 月 10 日至 9 月 13 日。

表 1 堆肥原材料基本性状

Table 1 Basic properties of composting materials

原料	有机碳含量 (%)	全氮含量 (g/kg)	含水率 (%)	电导率 (mS/cm)	pH 值
中药渣	46.8	25.2	27.7	4.76	9.23
鲜兔粪	54.5	22.9	75.8	3.27	8.31

表 2 堆肥原材料磷、钾含量与常见重金属元素含量

Table 2 Contents of phosphorus, potassium and common heavy metals in composting materials

原料	磷含量 (g/kg)	钾含量 (g/kg)	Cu 含量 (mg/kg)	Zn 含量 (mg/kg)	As 含量 (mg/kg)	Cr 含量 (mg/kg)	Pb 含量 (mg/kg)	Hg 含量 (mg/kg)	Cd 含量 (mg/kg)
中药渣	14.3	21.75	17.65	109.20	0.78	7.89	1.92	0.033 1	0.141 9
鲜兔粪	13.4	12.23	16.43	75.03	0.59	7.56	1.24	0.026 7	0.049 5

### 1.2 样品采集

在堆制 0 d、2 d、4 d、6 d、10 d、14 d、19 d、24 d、29 d、34 d,采用剖面分层等量取样法取样,即在纵向将堆体分成 3 层,在每层(上层:5~15 cm,中层:50~60 cm,下层:100~120 cm)分别采集等量样品,将 3 层的样品混合后,采用四分法分取样品,每次取样获得 3 个样品。把各样品分为 2 份,1 份为鲜样,用于测定无机氮含量,1 份为自然风干的样品,粉碎后用于测定灰分含量、氮含量、磷含量、钾含量、重金属元素含量、有机质含量、腐殖酸含量等指标。

### 1.3 测定项目及测定方法

1.3.1 堆体温度测定 兔粪堆肥堆制期间,在每次取样的上午,定时用 testo 905-T1 智能温度测定仪于堆体中部随机取 5 个点测定温度,取其平均值作为当天的堆体温度,测温时间分别为堆制 0 d、2 d、4 d、6 d、10 d、11 d、12 d、13 d、14 d、15 d、19 d、24 d、29 d、30 d、31 d、32 d、33 d、34 d。

1.3.2 含水量测定 采用 105 ℃ 烘干称质量法测定堆肥含水量,测定时间为堆制 0 d、2 d、4 d、6 d、10 d、14 d、19 d、24 d、29 d、34 d。

1.3.3 灰分含量测定 采用马弗炉灼烧法测定堆肥样品灰分含量。

1.3.4 pH 值、电导率及发芽指数测定 用水浸提鲜样,料液比为1 g : 10 ml,浸提液用于测定 pH 值、电导率及发芽指数,测定时间同方法 1.3.2。用 Mettler Toledo FiveEasy Plus 型 pH 计测定 pH 值,用 EC215 Conductivity Meter 电导率仪测定电导率。发芽指数测定方法:在直径为 9 cm 培养皿内垫 1 张滤纸,均匀加入 10 粒大小基本一致、饱满的黄瓜种子和萝卜种子,加入 5 ml 浸提液,盖上皿盖,在 25 ℃ 培养箱中培养 48 h,统计发芽率并测量根长,每个样品设 4 个重复,以去离子水作为对照,计算公式:种子发芽指数=(浸提液处理种子发芽率×浸提液处理发芽种子平均根长)/(对照种子发芽率×对照发芽种子平均根长)×100%。

1.3.5 氮、磷、钾含量测定 用浓硫酸-过氧化氢消解后,采用凯氏定氮法测定全氮(TN)含量,磷含量采用钼黄显色光度法测定,钾含量采用 PinAA-Cle900T 原子吸收分光光度计测定。

1.3.6 铵态氮含量测定 称取5~10 g 新鲜样品,加入 100 ml 2 mol/L KCl 溶液浸提,4 000 r/min 离心 10 min,取上清,用 SmartChem 200 流动分析仪测定。

1.3.7 重金属元素含量测定 采用硝酸-高氯酸(体积比为4 : 1)在 130~200 ℃ 条件下消解样品,用 iCAP Qc 电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定 Cu、Zn、As、Cr、Cd、Pb、Hg 含量。

1.3.8 有机质含量测定 采用重铬酸钾法测定有机质含量,先沸水浴消解 30 min,再用 0.2 mol/L 硫酸亚铁滴定。

1.3.9 腐殖酸及其组分含量测定 (1)测定总腐殖酸含量的准备过程。称取 1 g 风干后粉碎的样品于 150 ml 锥形瓶内,加入 0.033 63 mol/L (1.5%) 焦磷酸钠( $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ )与 0.175 mol/L NaOH 混合提取液 100 ml,将小漏斗置于锥形瓶上,沸水浴加热提取 2 h,在加热过程中经常摇动,然后将溶液于 4 000 r/min 离心 5 min,过滤得上清液,取 5 ml 滤液于恒温干燥箱内,在 90~96 ℃ 的温度下烘至近干,待测。(2)测定水溶性腐殖酸(水溶性碳)含量的准备过程。称取 1 g 样品于 150 ml 锥形瓶内,加入 100 ml 蒸馏水或超纯水,将小漏斗置于锥形瓶上,沸水浴加热提取 0.5 h,在加热过程中经常摇动,然后将溶液于 4 000 r/min 离心 5 min,将上清液再次过滤

后取 20 ml 滤液于恒温干燥箱内,在 90~96 ℃ 的温度下烘至近干,待测。(3)测定游离腐殖酸含量的准备过程。称取 1 g 样品于 150 ml 锥形瓶内,加入 100 ml 0.025 mol/L NaOH,将小漏斗置于锥形瓶上,沸水浴加热提取 0.5 h,在加热过程中经常摇动,然后将溶液于 4 000 r/min 离心 5 min,将上清液过滤,取 10 ml 滤液于恒温干燥箱内,在 90~96 ℃ 的温度下烘至近干,待测。(4)测定胡敏酸含量的准备过程。取 20 ml 总腐殖酸滤液于 100 ml 小烧杯中,在沸水浴的同时逐滴加入 0.1 mol/L  $\text{H}_2\text{SO}_4$  溶液,边加边摇动,至提取液出现絮状沉淀,之后沸水浴加热 10 min,使胡敏酸完全沉淀,从而使胡敏酸与富里酸充分分离。过滤后用 0.01 mol/L  $\text{H}_2\text{SO}_4$  洗涤滤纸和沉淀,至滤液为无色,表明富里酸已完全洗去。用热的 0.02 mol/L NaOH 溶解沉淀,将溶解液收集于 150 ml 锥形瓶中,再次用 0.1 mol/L  $\text{H}_2\text{SO}_4$  酸化至出现絮状沉淀,在恒温干燥箱内 90~96 ℃ 的温度条件下烘至近干,待测。

烘至近干的待测腐殖酸及其组分含量用重铬酸钾法测定,沸水浴消解 30 min 后用 0.2 mol/L 硫酸亚铁滴定。

## 1.4 数据分析

试验数据用 Excel 进行整理、作图。

# 2 结果与分析

## 2.1 兔粪堆肥在堆制过程中温度、含水量、灰分含量的变化

由图 1a 可以看出,堆制 34 d 时,堆肥已经经过升温-高温阶段,还未到降温期,堆肥温度在堆制 2 d 时达到 60 ℃ 以上;堆制 2~34 d,堆肥处于高温期且温度保持在 60~70 ℃。由图 1b 可以看出,在整个堆制过程中,堆肥含水量呈持续降低的趋势,从最初的 69% 降至堆制 34 d 时的 44%,达到堆肥产物质量要求标准(NY/T 3442-2019《畜禽粪便堆肥技术规范》)。由图 1c 可以看出,堆肥灰分含量呈现先增加后降低的趋势,从初始的 25.00% 上升至堆制 24 d 时的最高值 40.62%,再降至堆制 34 d 时的 35.87%。

## 2.2 兔粪堆肥在堆制过程中电导率、pH 值及无机氮含量的变化

由图 2a 可以看出,在堆制期间,堆肥电导率整体呈先上升后稍下降的趋势,由初始的 2.80 mS/cm 升高至堆制 24 d 时的 4.06 mS/cm,之后略有下降,

至堆制 34 d 时为 3.98 mS/cm;堆肥的 pH 值呈现先波动升高后平缓降低的趋势,由初始的 8.40 升高至堆制 10 d 时的最高值 9.37,之后开始缓慢下降,至堆制 34 d 时为 9.28。由图 2b 可以看出,堆肥的铵态氮含量呈现先增加后减少的趋势,由初始的 5.41 g/kg 增加至堆制 2 d 时的最高值 6.49 g/kg,之后持

续下降,至堆制 34 d 时降至 3.02 g/kg;堆肥的硝态氮含量在堆制 0~15 d 呈增加的趋势,由初始的 0.44 g/kg 快速增加至堆制 6 d 时的 0.95 g/kg,之后缓慢增加,至堆制 14 d 时达最高值 1.00 g/kg,堆制 19 d 时突然下降,之后再次增加,至堆制 29 d 时为 0.99 g/kg,在堆制 34 d 时降至 0.85 g/kg。

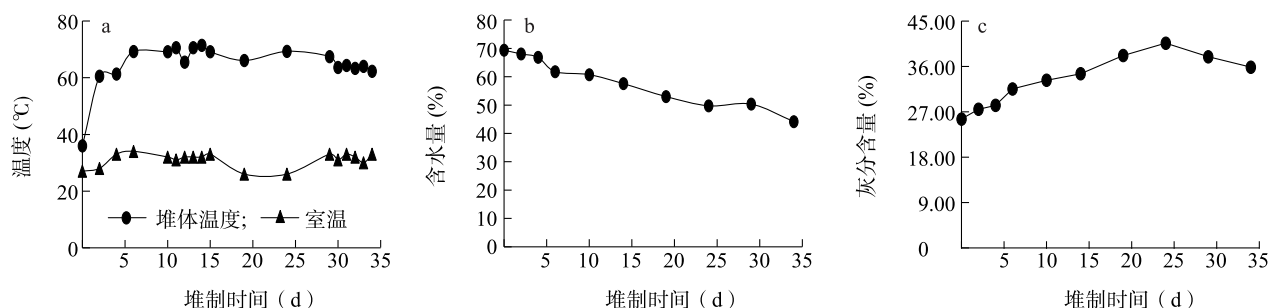


图 1 兔粪堆肥堆制过程中温度、含水量及灰分含量的变化

Fig.1 Changes of temperature, water content and ash content during composting of rabbit manure

### 2.3 兔粪堆肥堆制过程中氮、磷、钾养分含量的变化

由图 2c 可知,在堆制的 0~2 d,堆体的全氮含量由 23.16 g/kg 下降至 19.93 g/kg,至堆制 24 d 时,堆肥的全氮含量维持在 20.00 g/kg 左右,之后缓慢增加,至堆制 34 d 时,达到 24.60 g/kg。堆肥的五氧化二磷含量总体呈先增加后降低的趋势,在堆制起

始阶段为 25.26 g/kg,在堆制 14 d 时增加至最高值 35.43 g/kg,之后略有下降,并保持在 33.70~34.50 g/kg。在堆制期间,堆肥的氧化钾含量波状增加,从初始的 15.89 g/kg 增加至堆制 34 d 时的 26.29 g/kg。在堆制期间,堆肥的氮、磷、钾总养分含量呈波状增加,从初始的 64.31 g/kg 增加至堆制 34 d 时的 85.26 g/kg。

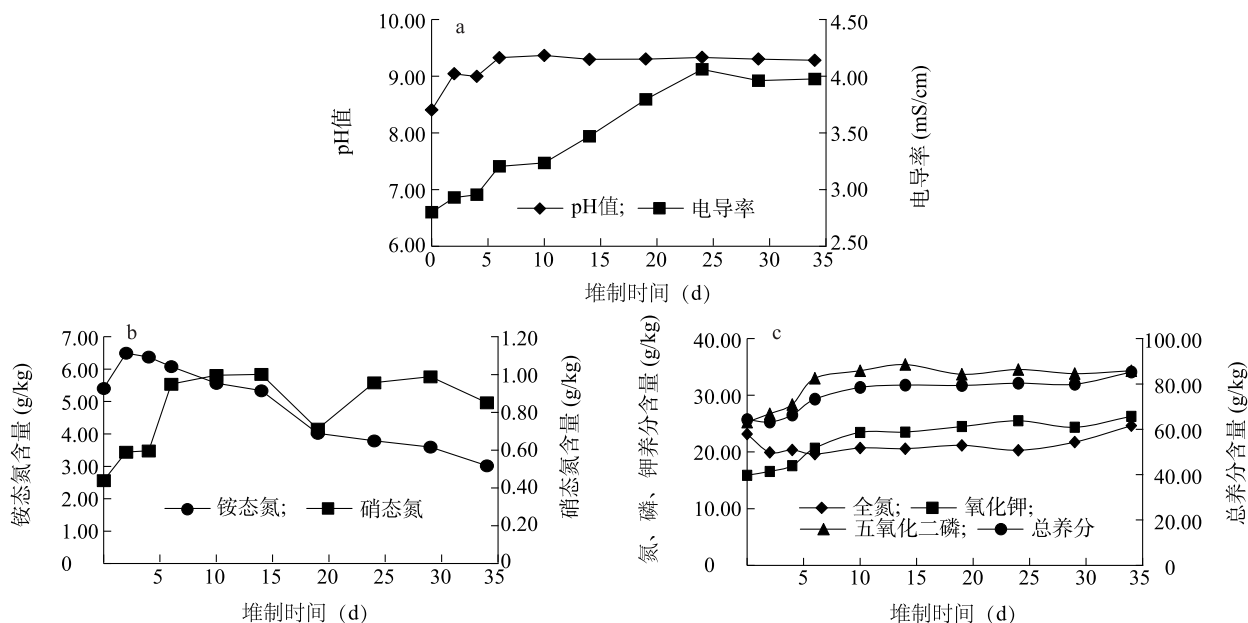


图 2 兔粪堆肥堆制过程中电导率、pH 值、无机氮含量及氮、磷、钾养分含量

Fig.2 Electrical conductivity, pH value, inorganic nitrogen content and nitrogen, phosphorus and potassium nutrients contents during composting of rabbit manure



## 2.4 兔粪堆肥堆制过程中有机质含量、碳氮比、水溶性碳含量与木质纤维素含量的变化

由图 3a 可以看出,在堆制期间,堆肥的有机质含量呈波动降低趋势,由起始阶段的 53.76% 降至堆制 34 d 的 42.00% 左右,堆制 34 d 较堆制 29 d 略有增加;堆肥碳氮比整体呈降低趋势,在堆制 0~6 d 保持在 14.70~15.50,在堆制 6 d 时达到最高值 15.50,之后持续降低,至堆制 34 d 时为 10.23。由图 3b 可以看出,堆肥的水溶性碳含量整体呈波动增加趋势,从堆制初始阶段的 24.88 g/kg 持续升高至

堆制 14 d 时的最高值 30.33 g/kg,之后略有降低,至堆制 34 d 时为 29.37 g/kg。由图 3c 可以看出,堆肥的半纤维素含量整体呈降低趋势,从初始的 20.93% 快速降至堆制 6 d 时的 13.23%,之后缓慢降低,在堆制 24 d 时降为 10.92%,堆制 24 d 后维持在 10.50% 左右;堆肥的纤维素含量在堆制期间呈缓慢波动式下降,从初始的 14.26% 降至堆制 24 d 时的 10.72%,之后略有上升,至堆制 34 d 时为 12.34%;堆肥的木质素含量呈持续、缓慢波动式增加,从初始的 5.27% 增加至堆制 34 d 时的 8.44%。

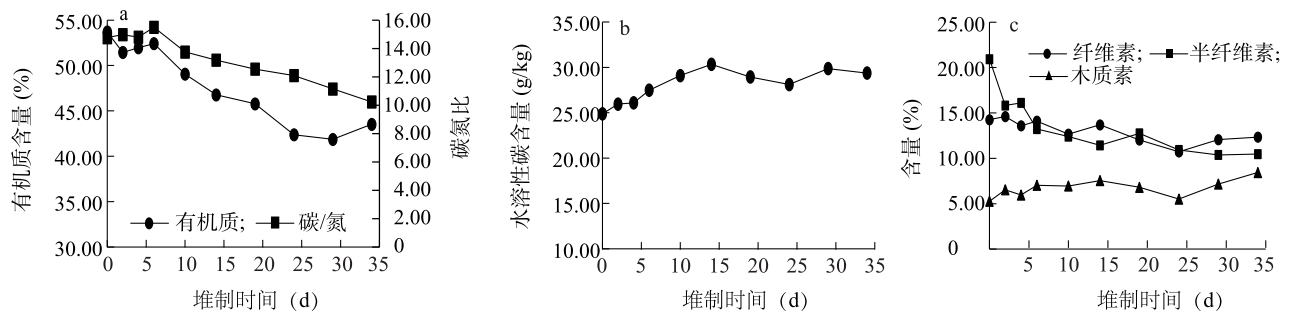


图 3 兔粪堆肥堆制过程中有机质含量、水溶性碳含量与木质纤维素含量

Fig.3 Contents of organic matter, water-soluble carbon and lignocellulose during composting of rabbit manure

## 2.5 兔粪堆肥堆制过程中腐殖酸含量及其组分的变化

由图 4a 可以看出,堆肥的总腐殖酸含量总体呈降低趋势,在堆制 0~6 d,堆肥总腐殖酸含量持续降低,从初始的 162.92 g/kg 快速降至堆制 6 d 的 127.84 g/kg,之后略有增加并维持在 130.00 g/kg 左右;富里酸包括小分子的有机碳,堆制期间富里酸含量的变化趋势与总腐殖酸含量的变化趋势类似,在

堆制 0~6 d 降低,从初始的 78.62 g/kg 降至堆制 6 d 的 57.58 g/kg,堆制 6 d 后缓慢波动下降,至堆制 34 d 时为 56.76 g/kg;堆肥的胡敏酸含量大致呈先降低后增加的趋势,由初始的 84.24 g/kg 缓慢降至堆制 14 d 时的 68.59 g/kg,之后则缓慢波动增加,至堆制 34 d 时为 76.11 g/kg。由图 4b 可以看出,堆肥的胡敏酸/富里酸表现为持续的波状升高,由初始的 1.07 升高至堆制 34 d 时的 1.34。

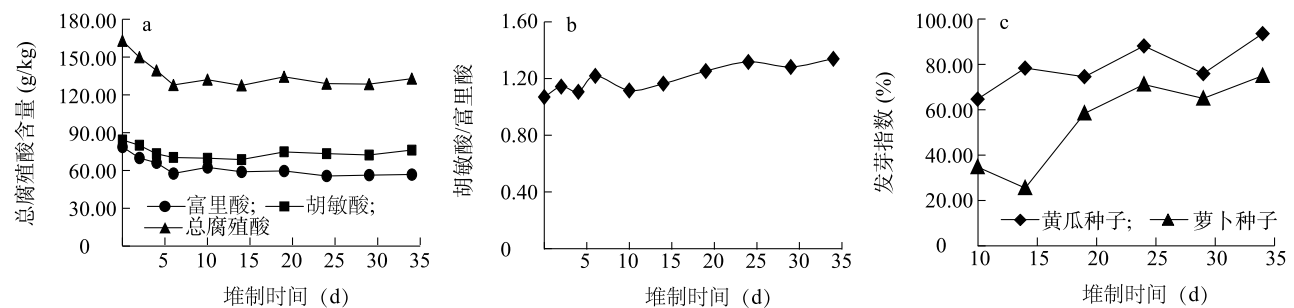


图 4 兔粪堆肥发芽指数、总腐殖酸含量及胡敏酸/富里酸

Fig.4 Germination index, total humic acids content and humic acid/fulvic acid in rabbit manure compost

## 2.6 不同堆制程度兔粪堆肥对发芽指数的影响

由图 4c 可以看出,分别采用黄瓜种子、萝卜种子进行发芽试验,发芽指数呈波状升高趋势,黄瓜种

子的发芽指数高于萝卜种子,表明萝卜种子对堆肥的毒害性反应更敏感。黄瓜种子的发芽指数由堆制 10 d 时的 64.68% 提高至堆制 34 d 时的 93.61%,堆

制 14 d 时为 78.00%。萝卜种子的发芽指数由堆制 10 d 时的 34.77% 提高至堆制 34 d 时的 75.00%，堆制 24 d 时为 71.20%。

## 2.7 兔粪堆肥堆制过程中重金属含量的变化

由图 5a 可以看出,堆制期间堆肥的 Cu 含量缓慢地波状增加,由初始值 16.56 mg/kg 增加至堆制 34 d 时的 19.86 mg/kg; Zn 含量呈缓慢波状增加趋势,由初始的 78.42 mg/kg 增加至堆制 34 d 时的 96.77 mg/kg; Cr 含量呈增→降→增→降的趋势,由初始的 7.59 mg/kg 增加至堆制 4 d 时的最高值 14.42 mg/kg,至堆制 34 d 时降至 6.92 mg/kg。由图 5b 可以看出,As 含量呈缓慢波状增加趋势,由初

始的 0.61 mg/kg 增加至堆制 34 d 时的 0.69 mg/kg; Pb 含量呈缓慢波状增加趋势,由初始的 1.31 mg/kg 增加至堆制 34 d 时的 1.71 mg/kg。由图 5c 可以看出,Hg 含量呈先增加后波状降低趋势,由初始的 0.027 4 mg/kg 增加至堆制 2 d 时的 0.044 2 mg/kg,之后逐渐降低,至堆制 34 d 时为 0.014 0 mg/kg; Cd 含量呈增加趋势,由初始的 0.058 8 mg/kg 增加至堆制 34 d 时的 0.098 7 mg/kg。堆肥中各重金属含量均低于 NY/T 3442-2019《畜禽粪便堆肥技术规范》及 NY 525-2012《有机肥料》规定的限量标准(As 含量  $\leq 15$  mg/kg, Hg 含量  $\leq 2$  mg/kg, Pb 含量  $\leq 50$  mg/kg, Cd 含量  $\leq 3$  mg/kg, Cr 含量  $\leq 150$  mg/kg)。

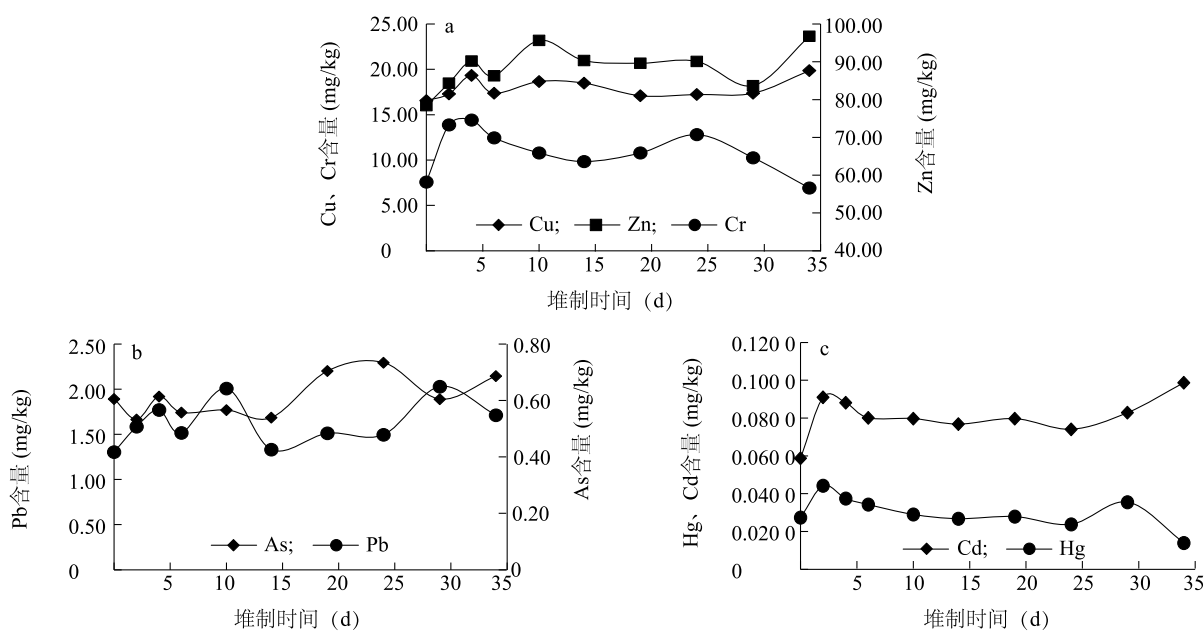


图 5 兔粪堆肥堆制过程中重金属含量的变化

Fig.5 Changes of heavy metals contents during composting of rabbit manure

## 3 讨论

### 3.1 堆制过程中堆肥 pH 值与氮素的变化

与 NY/T 3442-2019《畜禽粪便堆肥技术规范》<sup>[4]</sup>及 NY 525-2012《有机肥料》<sup>[5]</sup>相比,兔粪堆肥发酵 34 d 时,除 pH 值(9.28)偏高外,其他测定指标均达到标准要求,可以作为有机肥料在农业生产中推广使用。堆肥 pH 值整体呈现先升高后降低趋势,与前人的研究结果一致<sup>[6-7]</sup>。因为在堆制初期,有机碳快速降解产生的有机酸、无机酸少于有机氮快速分解产生的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,此时硝化细菌活动无法

及时将  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  转化为  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ,从而使铵态氮大量积累,引起 pH 值升高<sup>[8-9]</sup>;随着堆制时间的增加,促使堆体内积累的铵态氮以氨气的形式大量释放到空气中,同时堆体内硝化细菌的硝化作用使部分铵态氮转为硝态氮<sup>[10-12]</sup>,最后使得堆体内有机物分解产生的小分子有机酸、无机酸等酸性物质相对增多,使 pH 值下降<sup>[8,13]</sup>。

在本试验中,堆肥发酵的 pH 值为 8.40~9.37,堆制 34 d 时堆肥的 pH 值为 9.28,高于堆肥及有机肥料标准规定的要求(pH 值为 8.50),这一结果也高于国内猪粪<sup>[6,13]</sup>、牛粪<sup>[14]</sup>、鸡粪<sup>[15]</sup>、羊粪<sup>[16-17]</sup>、鸭

粪<sup>[18]</sup>等粪便堆肥的 pH 值。但不是所有兔粪堆肥的 pH 值均高于 8.50,文斌等<sup>[19]</sup>通过兔粪与菌渣的堆制试验得出,最终 pH 值为 8.20~8.60,平均为 8.39 左右。本试验所得兔粪堆肥 pH 值较高,可能是由堆肥原料等多种因素引起的。研究发现,堆制初期的酸碱度会直接影响最终堆肥产品的质量<sup>[6]</sup>,本试验所用中药渣的 pH 值较高,为 9.23,所用新鲜兔粪的 pH 值也较高,为 8.31。段恩泽等<sup>[1]</sup>认为,鲜兔粪是 pH 值在 8.00 以上的碱性物质,其 pH 值高于猪粪、鸡粪、鸭粪、牛粪及羊粪的 pH 值。此外,堆肥原材料的 C/N 可能也会影响堆肥的 pH 值。一般情况下,细菌细胞的 C/N 平均约为 5,1 份碳平均约需 4 份氮氧化释放出能量供合成细胞物质和满足其他生命活动所需,因此,在生长繁殖过程中,需要从外界吸收利用有机质的 C/N 大致为 25<sup>[20]</sup>。一般认为 C/N 过低,微生物生长繁殖所需的能量来源受到限制,发酵温度上升缓慢,过量氮会以氨气的形式释放,有机氮损失大<sup>[21]</sup>。而在本试验中,兔粪中药渣初始 C/N 较低,为 14.77,碳源不足,不能提供足够的能量给细菌使铵态氮向硝态氮转化,在堆肥高温期与高 pH 值的条件下,大量铵态氮只能以氨气的形态挥发出去<sup>[21-23]</sup>,导致堆肥全氮含量先降低,之后维持在较低状态,直至堆制 24 d 才呈缓慢增加的趋势,同时大量铵态氮存贮于堆肥内,使堆肥 pH 值保持较高的水平。韩战强等<sup>[24-25]</sup>对羊场 C/N 相对较低的纯羊粪进行堆肥发现,其最终 pH 值均为 9.0~9.5。由此可见,规模兔场在进行兔粪堆肥时,应适当添加 C/N 高的有机物料,调节堆肥原料的 C/N 在合适范围,从而控制堆肥 pH 值在合适范围,减少氨气的排放,尽可能多地保存堆肥的氮素。

### 3.2 堆肥碳素的变化

一般认为,当堆肥温度在 55 ℃ 以上并维持 15 d,就能达到粪便无害化卫生标准(NY/T 3442-2019《畜禽粪便堆肥技术规范》)。本试验在夏天进行,从堆肥温度与含水量看,堆制 2~34 d 时,堆肥温度保持在 60~70 ℃,同时由于堆肥的高温,使水分含量从最初的 69%持续下降至堆制 34 d 时的 44%,促使堆肥腐殖化。而本试验在 C/N 较低的情况下还能够使堆肥长期(33 d)保持在高温(60~70 ℃)期,可能因为兔粪属于热性肥料,C/N 低,易腐熟<sup>[26]</sup>,但是堆肥 C/N 较低时,堆肥的碳素损失也相应较低,本试验堆肥有机质含量及 C/N 在前期的变化较小,

这与前人的研究结果<sup>[23,27]</sup>一致。持续高温抑制了能分解纤维素、木质素菌群的活性,使得堆肥高温期有机碳损失量较低<sup>[28]</sup>。

在堆制过程中,总腐殖酸含量及其组分胡敏酸与富里酸含量的变化不同,甚至相反。Inbar 等<sup>[29]</sup>在研究牛粪堆制过程中发现,堆肥总腐殖酸含量从 184 g/kg 提高到 457 g/kg。而李吉进等<sup>[30]</sup>将鸡粪和牛粪混合堆腐后发现,总腐殖酸含量呈下降趋势。张霞等<sup>[31]</sup>通过研究猪发酵床垫料发现,总腐殖酸含量呈现先下降后上升的趋势,且最后的结果高于初始值。张雪英<sup>[32]</sup>研究发现,经过 49 d 堆腐的污泥堆肥,相对分子质量>25 000 的腐殖质组分含量提高了 68%,而相对分子质量<1 000 的腐殖质组分含量降低了 64%。马怀良等<sup>[33]</sup>认为,C/N 是堆肥发酵的关键条件,可以影响堆制过程中腐殖酸及其组成,具体表现为:当 C/N 为 20、25、30、35 时,总腐殖酸含量呈现先增加后降低的趋势;当 C/N 为 30、35 时,最终的总腐殖酸含量高于初始含量;当 C/N 为 20、25 时,最终的总腐殖酸含量则低于初始值;当 C/N 为 40、45 时,总腐殖酸含量呈现持续降低的趋势;当 C/N 为 30 时,堆肥腐熟后总腐殖酸的生成量最多。在本试验中,堆肥的总腐殖酸含量从最初的 162.92 mg/kg 降至堆制 6 d 时的最低值 127.84 mg/kg,并保持在 130.00 mg/kg 左右,这可能也是由于堆肥物料的 C/N 较低,堆体不能提供更多碳素来支持腐殖酸的生成,从而影响总腐殖酸的生成。本试验中的富里酸含量大致呈持续降低的趋势,胡敏酸含量则大致呈先降低后增加的趋势,这与马怀良等<sup>[34]</sup>的结果一致。尽管前人得出的总腐殖酸含量及其组分富里酸、胡敏酸含量的变化趋势不一致,但是堆制过程中胡敏酸与富里酸的比值(HA/FA)一致,均表现为上升的趋势。在本试验中,HA/FA 也表现为持续上升的趋势,说明堆肥的腐殖化程度在增加,这与前人的研究结果<sup>[31,34]</sup>相一致。

### 3.3 堆肥重金属含量的变化

本试验测定了兔粪堆肥中 Cr、Cu、Zn、As、Cd、Pb 及 Hg 等 7 种元素含量,最后 1 次取样结果表明,Cr 含量(6.92 mg/kg)、As 含量(0.69 mg/kg)、Cd 含量(0.098 7 mg/kg)、Pb 含量(1.72 mg/kg)及 Hg 含量(0.014 0 mg/kg)均低于 NY/T 3442-2019《畜禽粪便堆肥技术规范》<sup>[4]</sup>与 NY 525-2012《有机肥料》<sup>[5]</sup>规定的限量标准(Cr 含量≤150 mg/kg,As 含



量 $\leq 15$  mg/kg, Cd 含量 $\leq 3$  mg/kg, Pb 含量 $\leq 50$  mg/kg, Hg 含量 $\leq 2$  mg/kg)。Cu 含量(19.86 mg/kg)、Zn 含量(96.77 mg/kg)也均在 GB 4284-2018《农用污泥污染物控制标准》的控制范围(Zn 含量 $\leq 1\ 200$  mg/kg、Cu 含量 $\leq 500$  mg/kg)<sup>[35]</sup>内。

国内学者对畜禽粪便及其堆肥中重金属含量变化进行了大量研究。丁丽军等<sup>[36]</sup>对江苏泰州鸡、猪、鸭、鹅、牛粪便的研究发现,Cu、Zn、As、Cr、Pb、Cd 的平均含量分别为30.3~571.3 mg/kg、139~578 mg/kg、0.56~62.34 mg/kg、19.00~26.71 mg/kg、13.49~19.23 mg/kg、0.79~3.96 mg/kg,猪粪中的 Cu、Zn、As 及 Cd 含量显著高于鸭、鹅、牛粪,牛、鹅粪便中重金属含量较低。叶雪珠等<sup>[37]</sup>对浙江省内 96 家商品有机肥生产企业的 99 个商品有机肥样品的重金属含量研究发现,以猪粪、牛粪、鸡粪、羊粪、鸭粪及蚕沙为主要原料的商品有机肥中 Cu、Zn、As、Cr、Pb、Hg、Cd 的平均含量分别为42.3~284.6 mg/kg、302.3~770.8 mg/kg、3.7~6.3 mg/kg、14.5~44.2 mg/kg、12.3~19.2 mg/kg、0.077~0.220 mg/kg、0.49~1.20 mg/kg,猪粪有机肥内 Cu、Zn、As 含量较高,牛粪与鸡粪有机肥次之。袁凯等<sup>[38]</sup>研究发现,猪、鸡、牛粪便的平均铜含量分别为485 mg/kg、80.9 mg/kg、53.9 mg/kg,平均锌含量分别为1 220 mg/kg、405 mg/kg、156 mg/kg。与以上研究结果相比,本研究所用兔粪及其堆肥不同重金属(Cr、Cu、Zn、As、Cd、Pb 及 Hg)的平均含量均显著低于猪粪、鸡粪、牛粪、鸭粪、鹅粪及其堆肥重金属含量。由此可见,从重金属残留的角度认为兔粪是较为安全的有机肥原料。

### 3.4 堆肥腐熟度的变化

发芽指数是简单有效地评价堆肥腐熟度的最精确、最有说服力的指标<sup>[39-40]</sup>。一般认为发芽指数达到50%便说明堆肥对植物已无毒害作用,达到80%则认为堆肥已完全腐熟。NY/T 3442-2019《畜禽粪便堆肥技术规范》规定,堆肥发芽指数达到70%即可认为该堆肥已达标<sup>[4]</sup>。从本研究中黄瓜种子与萝卜种子的发芽指数可以看出,萝卜种子对堆肥的植物毒害性反应更敏感,而黄瓜种子对堆肥的植物毒害性反应迟钝。本研究采用萝卜种子发芽指数来确定堆肥腐熟情况,结果表明,在本试验条件下,兔粪堆制24 d已达到堆肥腐熟的要求。

## 4 结论

从堆制开始至堆制34 d,堆肥持续处于60~70℃的时间为32 d,堆制34 d时,堆肥含水量降至44%。堆肥中五氧化二磷含量、氧化钾含量及氮磷钾总养分含量均表现为前期增加较快,堆肥全氮含量呈先降低后增加的趋势。发酵温度、水分含量及氮磷钾总养分含量均达到堆肥产物质量标准(NY/T 3442-2019《畜禽粪便堆肥技术规范》)。堆肥 pH 值大致呈现先升高后降低的趋势,至堆制34 d时 pH 为9.28,呈碱性。

在堆制期间,堆肥有机质含量及碳/氮整体均表现为降低的趋势,分别由初始的53.76%、14.70降至堆制34 d时的42.00%、10.23;堆肥半纤维素、纤维素含量整体均呈降低趋势,木质素含量呈波状增加的趋势;堆体总腐殖酸、富里酸、胡敏酸含量总体均表现为降低趋势。发芽指数总体呈升高趋势,黄瓜种子发芽指数高于萝卜种子,因此采用萝卜种子发芽指数来确定堆肥腐熟情况,兔粪堆制24 d时已经达到堆肥腐熟的要求。

兔粪堆肥 Cr、Cu、Zn、As、Cd、Pb、Hg 含量均低于 NY/T 3442-2019《畜禽粪便堆肥技术规范》与 NY 525-2012《有机肥料》规定的限量标准。与前人的报道相比,本研究所用兔粪及其堆肥不同重金属(Cr、Cu、Zn、As、Cd、Pb 及 Hg)含量均显著低于猪粪、鸡粪、牛粪、鸭粪、鹅粪及其堆肥。

### 参考文献:

- [1] 段恩泽,麻剑雄,常楚晨,等.兔粪的物理化学性质与发酵有机肥利用[J].中国养兔,2018(6):36-39.
- [2] 张作祥.陇西县兔粪综合利用现状及处理方法[J].甘肃畜牧兽医,2018,48(3):33-34.
- [3] 陈丽娜,张晓芳,赵全利,等.保定市郊养殖场畜禽粪中重金属含量调查分析[J].中国农学通报,2008,24(5):357-362.
- [4] 中华人民共和国农业农村部.畜禽粪便堆肥技术规范:NY/T 3442-2019[S].北京:中国农业出版社,2019.
- [5] 中华人民共和国农业部.有机肥料:NY 525-2012[S].北京:中国农业出版社,2012.
- [6] 姜新有,王晓东,周江明,等.初始 pH 值对畜禽粪便和菌渣混合高温堆肥的影响[J].浙江农业学报,2016,28(9):1595-1602.
- [7] 李灵章,刘卓成,余雨泽,等.农作物秸秆与畜禽粪便组合的好氧堆肥理化性状研究[J].草原与草坪,2019,39(6):49-57.
- [8] 李帆,朱宏斌,郭熙盛,等.畜禽粪便高温堆肥过程中氨挥发



- 的机理及控制[J].安徽农业科学,2008,36(25):10996-10997.
- [9] 吴晓东,邢泽炳,何远灵,等.添加生物炭对鸡粪好氧堆肥过程中养分转化的研究[J].中国土壤与肥料,2019(5):141-146.
- [10] BERNAL M P, ALBURQUERQUE J A, MORAL R. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review [J]. Bioresource Technology, 2009, 100(22):5444-5453.
- [11] YUAN J, CHADWICK D, ZHANG D F, et al. Effects of aeration rate on maturity and gaseous emissions during sewage sludge composting[J].Waste Management, 2016,56:403-410.
- [12] 聂二旗,郑国砥,高定,等.适量通风显著降低鸡粪好氧堆肥过程中氮素损失[J].植物营养与肥料学报,2019,25(10):1773-1780.
- [13] 黄健,肖建中,唐世刚,等.添加蒙脱石对猪粪好氧堆肥腐熟度和重金属钝化的影响[J].浙江农业学报,2020,32(1):141-148.
- [14] 邵森,杨淑英,张增强,等.不同处理对高含水率奶牛粪堆肥好氧堆肥的影响[J].农业环境科学学报,2010,29(5):982-989.
- [15] 栾润宇,高珊,徐应明,等.不同钝化剂对鸡粪堆肥重金属钝化效果及其腐熟度指标的影响[J].环境科学,2020,41(1):469-478.
- [16] 荆红俊,杨硕,曹平,等.不同堆积高度的羊粪堆肥效果的影响[J].家畜生态学报,2017,38(11):41-46.
- [17] 宋春,徐锋,赵伟,等.羊粪-玉米秸秆高温堆肥优化配比研究[J].四川农业大学学报,2018,36(2):138-144.
- [18] 李霞,严永路,尹崧,等.鸭粪与芦苇皮、水草高温好氧堆肥试验研究[J].农业环境科学学报,2012,31(3):620-625.
- [19] 文斌,郭小林,傅祥超,等.三种菌剂在兔粪菌渣高温堆肥中的应用效果研究[J].草业与畜牧,2016(2):43-51.
- [20] 李阜棣,胡正嘉.微生物学[M].5版.北京:中国农业出版社,2000:235.
- [21] 秦莉,沈玉君,李国学,等.不同C/N比堆肥碳素物质变化规律研究[J].农业环境科学学报,2010,29(7):1388-1393.
- [22] BUSTAMANTE M A, PAREDES C, MARHUENDA-EGEA F C, et al. Co-composting of distillery wastes with animal manures: carbon and nitrogen transformations in the evaluation of compost stability[J]. Chemosphere,2008,72(4):551-557.
- [23] 秦莉,沈玉君,李国学,等.不同C/N比对堆肥腐熟度和含氮气体排放变化的影响[J].农业环境科学学报,2009,28(12):2668-2673.
- [24] 韩战强,刘石,张红超,等.规模化羊场粪便自然堆肥发酵技术[J].黑龙江畜牧兽医,2018(8):55-56.
- [25] 代黎,全学军,项锦欣,等.山羊粪污颗粒静态好氧堆肥过程的生物强化[J].环境工程学报,2014,8(11):4931-4936.
- [26] 谢雪芳.注意“冷热”特性巧施畜禽粪肥[J].科学种养,2009(4):61.
- [27] 尹瑞,张鹤,邱慧珍.不同碳氮比牛粪玉米秸秆堆肥的碳素转化规律[J].甘肃农业大学学报,2019,54(5):68-78.
- [28] 姜继韶,黄懿梅,黄华,等.猪粪秸秆高温堆肥过程中碳氮转化特征与堆肥周期探讨[J].环境科学学报,2011,31(11):2511-2517.
- [29] INBAR Y, CHEN Y, HADAR Y. Humic substances form during the composting of organic matter[J].Soil Science Society of America Journal,1990,54:1316-1324.
- [30] 李吉进,郝晋珉,邹国元,等.高温堆肥碳氮循环及腐殖质变化特征研究[J].生态环境,2004,13(3):332-334.
- [31] 张霞,李晟,顾洪如,等.不同猪发酵床垫料内腐殖质变化特性研究[J].农业环境科学学报,2015,34(11):2215-2221.
- [32] 张雪英.江苏地区城市污泥的基本性质及其强制通风堆肥技术研究[D].南京:南京农业大学,2001.
- [33] 马怀良,陈欢,龚振杰.不同初始C/N比对高温堆肥效果的影响[J].牡丹江师范学院学报(自然科学版),2008(2):7-8.
- [34] 马怀良,许修宏.不同C/N比对堆肥腐殖酸的影响[J].中国土壤与肥料,2009(6):64-66,73.
- [35] 国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会.农用污泥污染物控制标准:GB 4284-2018[S].北京:中国标准出版社,2018.
- [36] 丁丽军,韦芊含,袁华根,等.泰州地区畜禽粪便中重金属含量调查[J].畜牧与兽医,2019,51(12):34-39.
- [37] 叶雪珠,肖文丹,赵首萍,等.浙江省商品有机肥中重金属含量变化趋势及风险管控对策[J].植物营养与肥料学报,2020,26(5):954-965.
- [38] 袁凯,熊苏雅,梁静,等.畜禽粪便中铜和锌污染现状及风险分析[J/OL].农业环境科学学报,2020[2020-05-01].http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1347.S.20200417.0940.002.html.
- [39] 韩相龙,吴薇,赵鹏博,等.不同碳氮比对烟梗与牛粪堆肥过程的影响[J].江苏农业科学,2019,47(16):303-307.
- [40] 王海候,何胥,金梅娟,等.新型炭基辅料在堆肥工程中的应用效果[J].江苏农业科学,2018,46(11):243-247.

(责任编辑:徐艳)